

Eğitim Binalarında Faz Değiştiren Malzeme ve Isı Yalıtım Malzemesi Kombinasyonunun Ekonomik Optimizasyonu

Doğukan Kadir YEMENİCİ^{*1}, Kübra Ekiz BARIŞ²

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 41310, Kocaeli, Türkiye

² Kocaeli Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 41310, Kocaeli, Türkiye

(Alınış / Received: 10.12.2024, Kabul / Accepted: 28.02.2026, Online Yayınlanma / Published Online: 24.04.2026)

Anahtar Kelimeler

Faz değiştiren malzeme,
Isı yalıtım malzemesi,
Ekonomik optimizasyon,
Enerji maliyeti tasarrufu,
Geri ödeme süresi

Öz: Küresel ölçekte artan enerji talebi ve çevresel sorunlar, sürdürülebilir enerji çözümlerine duyulan ihtiyacı giderek artırmaktadır. Binalar, küresel enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarından önemli ölçüde sorumlu olduğundan enerji koruma stratejileri geliştirmek yapı sektörünün öncelikli hedefleri arasındadır. Bu bağlamda, ısı enerji depolama sistemleri, binalardaki ısıtma, soğutma ve havalandırma için tüketilen enerjiyi azaltmada etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Isıl enerji depolama sistemlerinden biri olan faz değiştiren malzemeler (FDM), gizli ısıyı erime veya donma gibi faz değişimleri sırasında depolayabilen yenilikçi malzemelerdir. Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin iklim koşullarında tasarlanan eğitim binalarının duvarlarında FDM kullanım olanaklarını ülkemizin ekonomik koşulları dikkate alınarak değerlendirmektir. Bu amaca yönelik olarak, tek katlı bir eğitim binası modeli Designbuilder Yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Türkiye'nin beş farklı iklim bölgesi için yalnızca FDM ve FDM ve ısı yalıtım (IY) malzemelerinin kombinasyonunu içeren duvar kesitlerine sahip yapıların ekonomik analizleri enerji maliyeti tasarrufu ve geri ödeme süresi kriterleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, farklı iklim koşullarında FDM ve IY kombinasyonunun binanın enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabileceğini, ancak geri ödeme süresinin iklim bölgesine ve malzeme kombinasyonuna göre değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur. Geri ödeme süresi ılıman veya sıcak iklim özelliklerine sahip bölgelerde kısa olmasına rağmen, nispeten soğuk bölgelerde daha uzundur. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde gerçekleştirilen ekonomik analizler sonucunda elde edilen geri ödeme süresi 6.66-36.62 yıl arasında değişmiştir. Elde edilen sonuçlar, binaların yönetmeliklerde belirtilen ekonomik ömründen kısa olduğundan FDM'nin ülkemiz ekonomik koşullarında yapı kabuğunda kullanımı açısından umut vaat etmektedir.

Economic Optimization of Combined Use of Phase Change Material and Thermal Insulation in Educational Buildings

Keywords

Phase change material,
Thermal insulation material,
Economic optimization,
Energy cost savings,
Payback period

Abstract: Global environmental problems and rising energy demand are driving a growing need for sustainable energy solutions. Since buildings are significantly responsible for global energy consumption and greenhouse gas emissions, developing energy conservation strategies is among the priority goals of the construction sector. In this context, thermal energy storage systems stand out as an effective solution to reduce the energy consumed for heating, cooling and ventilation in buildings. Phase change materials (PCM), one of the thermal energy storage systems, are innovative materials that can store latent heat during phase changes such as melting or freezing. The aim of this study is to evaluate the possibilities of using PCM on the walls of educational buildings designed in the climatic conditions of Türkiye, taking into account the economic conditions of our country. For this purpose, a single-story educational building model was simulated using Designbuilder software. Economic analysis of buildings with wall sections

containing only PCM and the combination of PCM and thermal insulation (TI) for five different climate zones of Türkiye were carried out by taking into account the energy cost savings and payback period criteria. The results revealed that the combination of PCM and TI in different climatic conditions could significantly reduce the energy consumption of the building, but the payback period varied depending on the climate region and the combination of materials. Although the payback period was short in regions with temperate or hot climates, it was longer in relatively cold regions. The payback period obtained as a result of economic analysis carried out in various climatic regions of Türkiye varied between 6.66-36.62 years. The results obtained were promising for the use of PCM in the building envelope in the economic conditions of Türkiye, since the economic life of the buildings was shorter than that stated in the regulations.

1. Giriş

Günümüzde çevresel sorunlar, küresel ısınma ve enerji krizi nedeniyle tüm sektörlerde enerji tüketimini azaltmayı kritik bir hale getirmiştir [1]. 21. yüzyıl, küresel enerji talebinin hızla artmasının yanı sıra, iklim değişikliği ve yükselen sera gazı emisyonları gibi ciddi çevresel sorunlarla karşı karşıyadır. Söz konusu sorunlar, dünya genelinde sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçişi ve karbon salınımlarını azaltmayı zorunlu kılmaktadır [2].

Binalar, dünya genelinde enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının %40'tan daha fazlasından sorumlu olduğundan, enerji korunumuyla ilgili stratejileri uygulamak yapı sektörünün öncelikli hedefleri arasındadır [3]. Özellikle yapılardaki enerji tüketiminin önemli bir kısmı yapıların ısıtılması, soğutulması ve havalandırılması sırasında tüketilmektedir [4]. Söz konusu enerji tüketimini azaltmanın etkili yöntemlerinden biri ısı enerji depolama sistemlerinin kullanımınıdır. Bu teknoloji, ısı enerjisini depolamakta ve hali hazırda enerji talebinin maksimum olduğu dönemlerdeki tüketimi dengelemeye ve azaltmaya yardımcı olmaktadır [5].

FDM, binaların ısı enerji depolama sistemlerinde kullanılan malzemelerdir [6]. Diğer yapı malzemelerine nazaran daha yüksek enerji depolama kapasitesine sahip olan FDM, gündüz güneşten gelen solar radyasyon sayesinde eriyerek ısıyı bünyesinde depolamakta ve sıcaklık azaldığında katılarak ısıyı ortama geri vermektedir. Böylece gün içerisinde dış ortam sıcaklığındaki dalgalanmaların iç ortam sıcaklığını etkilemesi engellenmekte ve iç ortamda ısı konfor koşullarının sürdürülmesi sağlanmaktadır [7]. Isıl konfor düzeyi korunduğu sürece iç mekânda mekanik yöntemlerle ısıtma ya da soğutma sistemlerine olan ihtiyaç ve dolayısıyla binanın yıllık toplam enerji tüketimi azalmaktadır.

Geleneksel İY, 0.1 W/mK'den daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip malzemeler olduğundan iç mekân ile dış ortam arasındaki ısı transferini yapı kabuğunun ısı direncini artırmak yöntemiyle azaltmaktadır [8]. [9] çalışmasında; Kuzey Afrika'daki farklı iklim bölgelerindeki analizler sonucunda, FDM

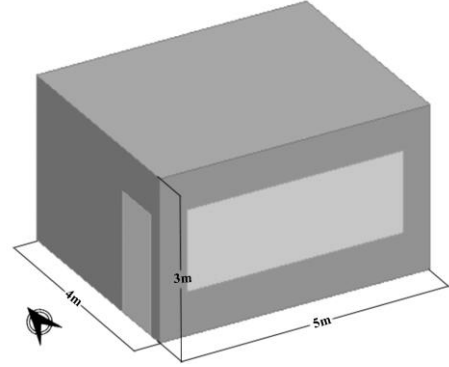
kullanımının tüm iklim koşullarında toplam enerji tüketimini azalttığı, GÖS'ün ise yapı ömründen kısa (7-43 yıl) olduğu belirlenmiştir. [10] çalışmasında; yalıtımsız FDM dış duvarın daha iyi ekonomik verimlilik ve daha fazla karbon salımı azaltımı sağladığı, yalıtım tabakası kalınlığının ise ekonomik ve çevresel faydaları olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır. [11] çalışması yapı kabuğunun ısı direnci arttıkça FDM etkinliğinin azaldığını, ancak FDM-İY kombinasyonunun klima enerjisini %27.2 oranında azaltarak GÖS'te %54'lük önemli bir düşüş sağladığını göstermiştir. [12] çalışması; Kuzey Afrika'nın farklı iklim bölgelerinde yürütülen simülasyon temelli analizler sonucunda, dört FDM tipinin farklı yapı kabuklarında enerji tüketimini azalttığını ve 7-43 yıl arasında değişen GÖS ile ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermiştir. [13] çalışmasında; bir binanın ısıtma ve soğutma yüklerinin eş zamanlı optimizasyonu için kullanılan bir yöntem ile, toplam maliyette %3-10 arasında daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. [14] çalışması; tarafından Avrupa kıtasının farklı yönelim ve lokasyonları için koşullandırılmış binalarda yaşam döngüsü değerlendirmesi ile FDM takviyeli yapı elemanlarının m² başına 1.36-6.95 gün arasında değişen GÖS sunduğunu göstermiştir. Yapı kabuğunun ısı performansını daha fazla geliştirmek üzere geleneksel İY ve yenilikçi teknoloji ürünleri olan FDM'lerin bir arada kullanımına yönelik çeşitli araştırma sonuçları yapılardaki enerji tüketimini azaltma bakımından umut vaat etmektedir [9, 10, 11, 12, 13, 14]. Önceki çalışmada, bir eğitim binasının ısı konforunu arttırmak ve yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimini azaltmak amacıyla Türkiye'nin beş farklı iklim bölgesinde FDM ve İY'nin çeşitli duvar kesitlerinde bir arada kullanım olanakları simülasyon yöntemiyle araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, FDM ve İY'nin bir arada kullanımıyla elde edilen enerji tasarruf oranlarının duvar kesitindeki malzeme katmanlaşmasına, bu malzemelerin duvar kesitindeki konumuna, FDM ve İY'nin kalınlıklarına ve FDM'nin erime sıcaklığına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Yaz döneminde duvar kesitinin iç bölgesinde 30 mm FDM (27 °C erime sıcaklığına sahip) ve dış bölgesinde 10 mm İY ve kış döneminde ise iç bölgede 30 mm FDM (21 °C erime sıcaklığına sahip) ve dış bölgede 30 mm İY kullanımıyla

enerjiden maksimum düzeyde tasarruf sağlandığı belirlenmiştir [15]. Bu bulgular doğrultusunda bu çalışmanın temel katkısı, FDM ve FDM-IY kombinasyonlarının Türkiye'nin güncel ekonomik koşulları dikkate alınarak kapsamlı bir ekonomik optimizasyona tabi tutulmasıdır. Gerek ısı performans gerekse enerji korunumu açısından başarılı sonuçlar alınmış olmasına rağmen, FDM ve IY malzemelerinin Türkiye'nin iklim koşullarında bir arada kullanımının yaygınlaştırılabilmesi için konunun ekonomik kriterler bağlamında da detaylıca değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu gereksinim doğrultusunda, bu araştırmanın temel amacı Türkiye'nin farklı iklim koşullarında tasarlanan eğitim binalarının duvar kesitlerinde FDM kullanımının enerji tasarrufu potansiyeli ile birlikte ekonomik etkinliğini de kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir. Bu doğrultuda, özellikle FDM'nin IY ile kombinasyonunun fizibilitesi, ülkenin ekonomik koşulları dikkate alınarak analiz edilmiştir. Analiz yöntemine yönelik olarak, tek katlı bir eğitim binası modeli temel alınmış ve bu modelin dinamik termal performansı Designbuilder yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Türkiye'yi temsil eden beş farklı iklim bölgesi için, FDM ve FDM-IY kombinasyonlarını içeren duvar kesitlerinin performansları değerlendirilmiştir. Ekonomik etkinliğin tespiti için "enerji maliyeti tasarrufu (EMT)" ve "geri ödeme süresi (GÖS)" gibi önemli ekonomik parametrelerin saptanması bu araştırmanın kapsamı içerisinde yer almaktadır. Bu kapsamlı metodolojik yaklaşım, FDM teknolojisinin Türkiye'deki yapı sektöründe uygulama potansiyelini teknik performans, enerji verimliliği ve maliyet-etkinlik boyutları da dahil olmak üzere bütüncül bir çerçevede bilimsel bir zeminle ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Simüle edilen binaya ait özellikler

Simülasyon için tek katlı bir eğitim binası modeli (500 cm uzunluk x 400 cm genişlik x 300 cm yükseklik) tasarlanmıştır (Şekil 1). Eğitim binası prototipinin ölçek seçimi, Milli Eğitim Bakanlığı (MEB) tarafından belirlenen standart sınıf alanlarına ve tipik bir derslik modülünün temsiline dayanmaktadır. Tipik bir eğitim binasının birden fazla derslik ve koridor içermesine karşın, bu ölçeklendirme tercihinin temel gerekçesi, hesaplama maliyetini optimize ederken FDM ve IY'nin duvar kesitleri üzerindeki ısı ve ekonomik etkilerini izole edebilmektir.



Şekil 1. Eğitim binasının geometrik modeli [15].

Yapı kabuğunda yer alan malzemelerin türü ve kalınlıkları TS 825 [16]'te belirtilen ısı iletkenlik katsayısına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Yalnızca sıva ve çekirdek katmanından oluşan ve herhangi bir FDM ya da IY katmanı bulunmayan duvar referans dış duvar olarak tanımlanmıştır. Yapı kabuğuna ait detaylar Tablo 1 ve kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Yapı kabuğu katmanlarının tasarımı [15].

Yapı Kabuğu Bileşeni	Katmanlar (İçeriden Dışarıya)
Çatı	20 mm çimento esaslı sıva, 120 mm betonarme döşeme, 30 mm çimento esaslı şap, 50 mm IY, su yalıtımı ve çakıl çatı kaplaması
	20 mm iç sıva, 240 mm gazbeton ve 20 mm dış sıva
Referans dış duvar	20 mm iç sıva, 240 mm gazbeton, 10/20/30 mm IY (cam yünü) ve 20 mm dış sıva
Isı yalıtımı entegre edilmiş dış duvar	20 mm iç sıva, 240 mm gazbeton, 10/20/30 mm FDM (BioPCM@ M27/Q21) ve 20 mm dış sıva

Tablo 2. Kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri [15].

Malzeme Türü	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)	Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ)
Çimento esaslı sıva	2000	1.6	15/35
Gazbeton	500	0.15	5/10
IY (cam yünü)	32	0.04	1

Araştırmada kullanılan 21 ve 27 °C erime sıcaklığına sahip FDM (BioPCM@ M27/Q21), DesignBuilder Programına ait veri tabanından seçilmiş olup sırasıyla 10 mm, 20 mm ve 30 mm kalınlığa sahiptir.

2.2. Simülasyon verileri

Eğitim fonksiyonuna sahip binanın kullanım saatleri 09.00-16.00 arasındır. Binanın doluluk oranı 0.55 kişi/m² olarak belirlenmiştir. Çalışma saatlerinde 3.4 W/m²-100 lx aydınlatma dikkate alınmıştır. Isıtma döneminde 19 °C ve soğutma döneminde 26 °C ısı konfor aralıkları olarak seçilmiştir. Yani iç sıcaklık 19 °C'nin altına düştüğünde ısıtma sistemi ve 26 °C'nin üzerine çıktığında soğutma sistemi devreye girmektedir. Binanın ısıtma ve havalandırma ihtiyacı mekanik sistemlerle karşılanmaktadır. Isıtma gereksinimi doğalgaz ve soğutma elektrik enerjisiyle sağlanmaktadır. Doğal havalandırmanın dinamik ve öngörülemez değişkenliği, FDM'nin ısı performansını etkileyebileceğinden, enerji maliyeti analizlerinin tutarlı ve tekrarlanabilir olmasını sağlamak amacıyla simülasyonlarda doğal havalandırmanın etkisi kapalı olarak kabul edilmiştir. "Sonlu Farklar Hesaplama

Yöntemi" olarak bilinen hesaplama tekniği kullanılarak [17] simülasyon sonuçları elde edilmiştir [15].

Farklı konum, kalınlık ve erime sıcaklığında FDM ve IY kullanılarak tasarlanan ve DesignBuilder Programı kullanılarak simüle edilen duvar kesitlerine sahip eğitim binasının yıllık toplam ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimi Tablo 3'te verilmiştir. Birinci derece iklim bölgesinde yer alan Antalya soğutma ağırlıklı bir iklime sahip olduğundan yıllık soğutma enerjisi tüketimi en yüksektir. Diğer iklim bölgelerinin temsili illerinde (İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum) ise ısıtma enerjisi tüketimi soğutmaya nazaran çok daha yüksektir. FDM-IY kombinasyonuna sahip duvar kesitlerinin ekonomik etkinliği hesaplanırken bu tabloda yer alan yıllık enerji tüketim miktarından yararlanılmıştır.

Tablo 3. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde farklı duvar kesitlerine sahip eğitim binasının yıllık toplam ısıtma ve soğutma enerjisi tüketim değerleri [15].

Duvar	İklim Bölgelerine Göre Enerji Tüketim Değerleri (kWh / yıl)									
	Antalya (1. Derece İklim Bölgesi)		İstanbul (2. Derece İklim Bölgesi)		Ankara (3. Derece İklim Bölgesi)		Van (4. Derece İklim Bölgesi)		Erzurum (5. Derece İklim Bölgesi)	
	Soğutma	Isıtma	Soğutma	Isıtma	Soğutma	Isıtma	Soğutma	Isıtma	Soğutma	Isıtma
Ref	284.43	125.6	58.62	303.4	39.11	433.9	110.45	386.5	111.63	354.3
FDM-10	246.38	115.3	51.23	284.3	33.41	406.6	96.83	362.1	96.76	331.9
FDM-20	238.69	115.1	49.84	284.0	31.95	405.3	93.97	361.3	93.90	331.1
FDM-30	235.88	114.8	48.99	283.2	30.77	404.3	92.63	360.4	92.56	330.3
FDM-10/IY-10	242.32	114.3	50.73	276.7	33.44	384.0	93.39	345.9	94.28	317.7
FDM-10/IY-20	243.99	113.2	51.55	274.4	34.16	380.7	94.21	343.3	95.03	315.0
FDM-10/IY-30	245.85	112.3	52.46	272.6	35.29	378.0	95.29	340.4	95.70	312.7
FDM-20/IY-10	229.23	113.0	46.46	276.6	31.73	383.1	88.98	341.2	89.99	313.3
FDM-20/IY-20	231.91	112.8	47.41	274.8	32.21	379.9	90.02	338.3	90.86	311.1
FDM-20/IY-30	234.16	112.6	48.49	273.4	32.90	377.3	91.15	336.2	91.67	308.6
FDM-30/IY-10	219.51	111.4	42.60	274.6	28.89	382.2	84.84	340.4	86.10	312.6
FDM-30/IY-20	221.26	110.9	43.62	273.5	29.52	379.2	85.67	337.6	86.97	310.2
FDM-30/IY-30	223.20	109.9	44.59	272.1	30.21	376.7	86.44	335.3	87.87	307.6

2.2. Ekonomik etkinlik değerlendirme yöntemi

Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde tasarlanan FDM-IY kombinasyonuna sahip duvar kesitlerinin ekonomik etkinliği hesaplanırken enerji maliyeti tasarrufu ve geri ödeme süresi kriterleri dikkate alınmıştır. İlk olarak EMT Denklem 1 uyarınca hesaplanmıştır [9]:

$$EMT = (ET_{yaz} * EM) + (ET_{kış} * DM) \quad (1)$$

ET_{yaz} ve $ET_{kış}$ (kWh), simüle edilen farklı duvar kesitlerine sahip binanın yıllık toplam soğutma ve ısıtma enerjisi tüketim miktarının referans duvara sahip binanın yıllık toplam soğutma ve ısıtma enerjisi tüketim miktarından farkını ifade etmektedir. EM elektrik maliyetini ve DM doğalgaz maliyetini sembolize etmektedir. TÜİK'e göre Türkiye'de yıllık elektrik maliyeti 139,1 kr/kWh ve yıllık doğalgaz maliyeti ise 29,5 kr/m³tür [18].

Simüle edilen binalarda farklı FDM-IY kombinasyonlarıyla elde edilen GÖS (yıl) Denklem 2 uyarınca hesaplanmıştır:

$$GÖS = \frac{[(M_{FDM} * V_{FDM}) + (K_{FDM} * İS_{FDM})]}{EMT} + \frac{[(M_{IY} * V_{IY}) + (K_{IY} * İS_{IY})]}{EMT} \quad (2)$$

M_{FDM} ve V_{FDM} sırasıyla FDM'nin maliyetini (TL/kg) ve hacmini (m^3), K_{FDM} kurulum maliyetini (TL/gün) ve $İS_{FDM}$ kurulum için gereken işçi sayısını sembolize etmektedir (Tablo 4). M_{IY} , V_{IY} , K_{IY} ve $İS_{IY}$ ise sırasıyla IY'nin maliyetini, hacmini, kurulum maliyetini ve işçi sayısını ifade etmektedir. Kurulum maliyeti hesaplanırken $5 \times 4 \times 3$ m ebatlarına sahip referans binanın iki işçi tarafından bir günlük çalışma ile tamamlanabildiği, FDM-IY entegre edilen binanın ise yine iki işçi tarafından birer gün olmak üzere toplamda iki günlük çalışma ile tamamlanabildiği kabul edilmiştir.

Tablo 4. EMT ve GÖS hesaplamalarında kullanılan parametreler

Parametre	Değer
FDM Maliyeti (TL/kg)	10 mm: 22.94
	20 mm: 45.88
	30 mm: 68.82
IY (cam yünü) Maliyeti (TL/kg)	10 mm: 28.00
	20 mm: 56.00
	30 mm: 84.00
FDM ve IY (cam yünü) Hacim (m^3)	10 mm: 0.4602
	20 mm: 0.9204
	30 mm: 1.3806
FDM ve IY (cam yünü) Alan (m^2)	46.02
FDM Üretim Tesisi	Kocaeli (Coral)
IY (cam yünü) Üretim Tesisi	Adana (İzocam)
İşçi 1 Günlük Ücreti (TL/gün)	2500

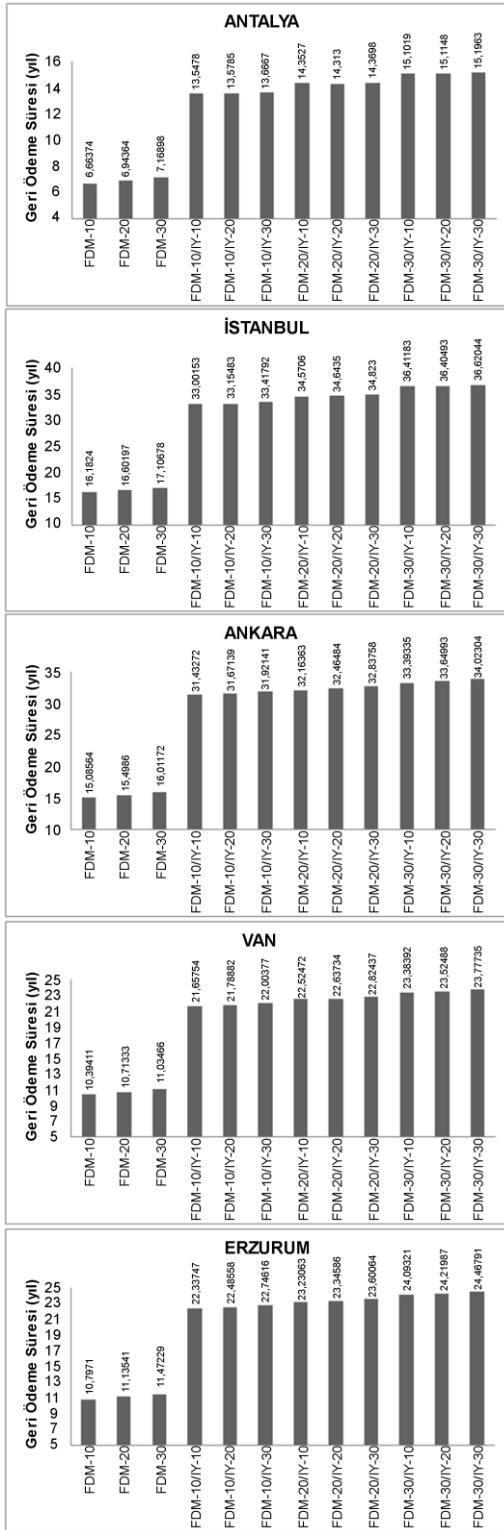
3. Bulgular

Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan eğitim binalarının yalnızca FDM ve FDM ve IY kombinasyonuna sahip yapı kabuğunun ekonomik etkinliğinin tespitinde EMT ve GÖS gibi önemli ekonomik parametreler hesaplanarak elde edilen değerler Şekil 2'de verilmiştir. Birinci derece iklim bölgesinde yer alan Antalya, yazları sıcak ve kurak, kışları ise ılıman geçen bir iklim özelliğine sahiptir [19]. Bu iklim özellikleri nedeniyle Antalya'da binalarda soğutma yükü, ısıtma yükünden çok daha belirleyici bir etkidir. Antalya'da sadece FDM kullanıldığında (FDM-10, FDM-20 ve FDM-30), GÖS sırasıyla 6.66 yıl, 6.95 yıl ve 7.17 yıl olarak tespit edilmiştir. En kısa GÖS (6.66 yıl) yalnızca FDM-10 içeren duvara sahip binada elde edilmiştir. Ancak, ekonomik değerlendirme yapılırken ısıl konfor parametrelerinden ödün verilmemelidir. Isıl konfor

açısından daha olumlu sonuçlar veren FDM-IY kombinasyonuna sahip duvar kesitlerinin ekonomik etkinliği incelendiğinde, sisteme IY eklendiğinde maliyet artışından dolayı GÖS'ün arttığı gözlemlenmektedir. Örneğin, soğutma dönemi için ideal performans gösteren FDM-30/IY-10 kombinasyonunda GÖS 15.10 yıl ve ısıtma dönemi için ideal performans gösteren FDM-30/IY-30 kombinasyonda ise GÖS 15.20 yıla çıkmaktadır. IY, binaların kış aylarında enerji tüketimini azaltmasına rağmen Antalya'da kış mevsimi kısa ve ılıman geçtiği için bu katkı daha sınırlı düzeyde kalmaktadır.

İlman nemli iklim özelliklerine sahip İstanbul'un mevsimsel sıcaklık dalgalanmaları, binaların hem ısıtma hem de soğutma yüklerine maruz kalmasına yol açmaktadır [20]. Bu nedenle, yapı kabuğunun enerji verimliliğini artırmak üzere FDM-IY kombinasyonlarının kullanılması büyük önem taşımaktadır. İstanbul'da sadece FDM kullanıldığında (FDM-10, FDM-20 ve FDM-30), GÖS sırasıyla 16.18 yıl, 16.60 yıl ve 17.11 yıl olarak tespit edilmiştir. Bu süreler, IY eklenmediği senaryoda dahi nispeten uzundur. Bunun temel nedeni, İstanbul'un ılımlı nemli iklim özelliklerinin FDM'nin etkisini sınırlaması ve yapı kabuğunda kullanılan bu malzemelerin maliyetinin, sağladığı enerji tasarrufuna nazaran GÖS'ü uzatmasıdır. FDM-IY kombinasyonları yine GÖS'ü uzatmaktadır. Soğutma dönemi için ideal ısı performans sergileyen FDM-30/IY-10 kombinasyonu ile 36.41 yıl ve ısıtma dönemi için ideal performans gösteren FDM-30/IY-30 kombinasyonu ise 36.62 yıl GÖS vermektedir.

Üçüncü derece iklim bölgesinin temsili ili olarak seçilen Ankara soğuk kış ve sıcak yaz aylarına sahip karasal bir iklim özelliği göstermektedir. Kış aylarında enerji tüketimi daha yüksek olmakla birlikte, yaz aylarındaki soğutma talebi de giderek artmaktadır [21]. Yalnızca FDM içeren duvar kesitine sahip binanın (FDM-10, FDM-20 ve FDM-30), GÖS değerleri sırasıyla 15.09 yıl, 15.50 yıl ve 16.01 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçtan, Ankara gibi sert kış koşullarına sahip bir bölgede FDM'nin enerji tasarrufuna katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Ankara'da tespit edilen GÖS değerleri İstanbul'daki değerlere yakındır. FDM-IY kombinasyonlarının GÖS'leri, önemli enerji tasarruflarının sağlanmasına rağmen Antalya'ya kıyasla oldukça uzundur. Soğutma dönemi için ideal ısı performans gösteren FDM-30/IY-10 duvar kesitinde 33.39 yıl ve ısıtma dönemi için ideal performans gösteren FDM-30/IY-30 kesitte ise 34.02 yıla kadar çıkmaktadır. Ankara'daki sert kış koşullarına rağmen, FDM kullanımı enerji verimliliğini artırmak için potansiyel taşımaktadır. Ancak, yalnızca FDM içeren kesitlerde GÖS 15 yılı ve FDM-IY içeren kesitlerde de 30 yılı aşması, bu teknolojileri Ankara'da, İstanbul'da olduğu gibi ekonomik açıdan daha az cazip hale getirmektedir.



Şekil 2. Türkiye'nin iklim bölgelerine göre geri ödeme süreleri

Dördüncü derece iklim bölgesinin temsili ili olan Van'da kış mevsimi oldukça uzun, soğuk ve sert geçerken yaz mevsimi ise kısa ve ılıman geçmektedir. Bu iklim özellikleri, binalarda özellikle kış aylarında yüksek ısıtma gereksinimini beraberinde getirmektedir [22]. Bu iklimde sadece FDM kullanılan duvar kesitlerine sahip binada (FDM-10, FDM-20 ve FDM-30), GÖS sırasıyla 10.39 yıl, 10.71 yıl ve 11.03 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, Van'da soğuk

kış koşullarında FDM'lerin enerji tasarrufuna daha fazla katkı sağladığını ve İstanbul ve Ankara'ya kıyasla daha hızlı geri dönüş süresi sunduğunu göstermektedir. FDM-IY kombinasyonları diğer bölgelerdekine benzer olarak GÖS'ün uzamasına neden olmaktadır. Soğutma dönemi için ideal ısı performans gösteren FDM-30/IY-10 kombinasyonu ile 23.38 yıl ve ısıtma dönemi için ideal ısı performans gösteren FDM-30/IY-30 kombinasyonu ile 23.78 yıl GÖS tespit edilmiştir. Ancak İstanbul ve Ankara'ya nazaran GÖS'lerinin daha kısa olması, söz konusu duvar kesitlerini Van'da ekonomik açıdan daha cazip hale getirmektedir.

Beşinci derece iklim bölgesinde bulunan Erzurum, Türkiye'nin en soğuk şehirlerinden biridir ve kış aylarının oldukça uzun ve karlı geçmesi ısıtma ihtiyacını oldukça arttırmaktadır [23]. Yalnızca FDM içeren duvar kesitlerine sahip binalarda (FDM-10, FDM-20 ve FDM-30), GÖS'ler sırasıyla 10.80 yıl, 11.14 yıl ve 11.47 yıl olarak hesaplanmıştır. Soğutma dönemi için optimum ısı performansına sahip FDM-30/IY-10 kombinasyonu ile 24.09 yıl ve ısıtma dönemi için optimum ısı performans gösteren FDM-30/IY-30 kombinasyonu ile 24.47 yıl olup Van ile benzer aralıktadır.

Bütün iklim bölgelerinde gerek FDM gerekse IY kalınlıklarının 10 mm'den kademeli olarak 20 mm ve 30 mm'e artırılması, daha fazla miktarda malzeme kullanımından ötürü, GÖS'ü nispeten arttırmaktadır. IY kalınlığı sabit tutulduğunda FDM kalınlığını arttırmak GÖS'ü nispeten daha fazla arttırmasına rağmen, FDM kalınlığı sabit tutulduğunda IY kalınlığını arttırmanın GÖS'ü arttırıcı etkisi çok daha kısıtlı düzeydedir. Buradan, yenilikçi bir teknoloji ürünü olan FDM'nin kalınlık artışının üretim maliyeti üzerindeki etkisinin geleneksel IY'ye nazaran daha fazla olduğu çıkarılabilir.

Farklı iklim koşullarında yapı kabuğunda enerji verimliliği sağlamak üzere FDM ve FDM-IY kombinasyonları incelendiğinde, her bölgenin kendine özgü iklim özelliklerine bağlı olarak GÖS'lerde farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu araştırmada ekonomik etkinliği incelenen bütün duvar kesitlerinde Antalya, İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum için GÖS'leri sırasıyla 6.66-15.20, 16.18-36.62, 15.09-34.02, 10.39-23.78 ve 10.80-24.47 olarak tespit edilmiştir. Bilindiği gibi, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre, binaların ekonomik ömrü genellikle 50 yıl olarak kabul edilmektedir [24]. Bu araştırmada tespit edilen GÖS'leri 50 yıldan daha kısa olduğundan dolayı, eğitim binalarında FDM ve IY'nin aynı duvar kesitinde bir arada kullanımını ekonomik kriterler bağlamında kabul edilebilir düzeydedir. Nitekim, bu araştırmada elde edilen GÖS değerleri, literatürde FDM-IY içeren duvar kesitlerine sahip binalarla gerçekleştirilen diğer araştırmaların sonuçlarıyla uyumlu olması bakımından önemlidir (Tablo 5).

Tablo 5. Farklı araştırmalarda tespit edilen GÖS'lerin karşılaştırılması

Referans	Şehir/Ülke	GÖS (yıl)
M'hamdi ve diğ., 2022	Ben Guerir/Fas	7.91-43.22
	Tunus	
Zhang ve diğ., 2024	Asvan/Mısır	10.13- 111.93
	Xi'an/Çin	
El-Raheim ve diğ., 2022	Kahire/Mısır	40.40- 57.60
	Asvan/Mısır	
Souayfane ve diğ., 2019	Sacramento/ABD	7.87-51.10
	Paris/Fransa	
	Toronto/Kanada	
	Dras/Hindistan	
	Kiruna/İsveç	
Mevcut Çalışma	Barentsburg/Norveç	6.66- 15.19
	Antalya/Türkiye	
	İstanbul/Türkiye	
	Ankara/Türkiye	
Mevcut Çalışma	Van/Türkiye	15.08- 34.02
	Erzurum/Türkiye	10.39- 23.77
	Erzurum/Türkiye	10.79- 24.46

4. Tartışma ve Sonuç

Araştırmanın bulgularından çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir:

- Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde FDM-IY içeren duvar kesitlerinin GÖS'leri, iklim koşullarına ve seçilen malzeme kombinasyonlarına göre değişiklik göstermektedir. Genel olarak, GÖS en düşük olan bölgeler sıcak ve ılıman iklime sahip şehirlerdir. Daha yüksek GÖS ise nispeten daha soğuk bölgelerde tespit edilmektedir.
- Sıcak iklime sahip Antalya'da GÖS değerleri, Türkiye'nin diğer iklim bölgelerine nazaran daha kısa olduğundan ekonomik açıdan daha caziptir. En uzun GÖS değerleri ise İstanbul ve Ankara'da tespit edilmiştir.
- FDM ve IY'nin bir arada kullanıldığı kombinasyonlar ve malzeme kalınlıklarının artırılması GÖS'ü artırıcı temel etkenlerdir. Ancak, FDM-IY kombinasyonlarının ısıtma ve soğutma dönemi için sağladığı yüksek ısı konfor, gün içerisinde iç mekandaki sıcaklık dalgalanmasını azaltıcı etki ve daha yüksek toplam ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf oranları dikkate alındığında bu iki malzemenin bir arada kullanımı yararlıdır. Bundan dolayı, yapı kabuğu tasarımı sırasında gerek ısı performans gerekse enerji ve ekonomiklik gibi önemli parametrelerin detaylı bir optimizasyonu yapılmalıdır.
- Bu çalışmada ekonomik etkinliği araştırılan yapı kabuklarında GÖS'lerinin (6.66-36.62

yıl) yönetmeliklerde belirlenen bina ekonomik ömründen (50 yıl) daha kısa olması, Türkiye'nin iklim koşullarında FDM-IY kombinasyonunun ümit verici olduğunu gözler önüne sermektedir.

- Elde edilen teknik ve ekonomik bulgular, FDM'lerin Türkiye inşaat sektörü için yüksek bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, inşaat sektörünün ölçeği ve artan enerji verimliliği düzenlemeleri göz önüne alındığında, yerel üretim kapasitelerinin artırılması FDM birim maliyetlerini düşürerek pazar penetrasyonunu hızlandıracaktır.

GÖS hesaplamaları, elektrik ve doğalgaz birim fiyatları sabit kabul edilerek ve enflasyon ile fiyat artışları hesaba katılmadan yapılmıştır. Gelecekteki enerji fiyat senaryolarının optimizasyona dâhil edilmesi durumunda, FDM entegrasyonu kaynaklı maliyet tasarruflarının değeri artacağından, GÖS'lerin mevcut değerlerden daha kısa sürelerle inebileceği öngörülmektedir.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Conti, J. 2018. U.S. Energy Information Administration: Annual Energy Outlook 2018. U.S. Energy Information Administration. https://www.eia.gov/pressroom/presentations/conti_020132018.pdf
- [2] Fereidoni, S., Nabisi, M., Fereidooni, L., Javidmehr, M., Zirak, N., Kasaeian, A. 2023. An assessment of the impact of building envelope design on the tradeoff between embodied and operating energy. Energy Building.
- [3] Christopher, S., Vikram, M.P., Bakli, C., Thakur, A.K., Ma, Y., Ma, Z. 2023. Renewable energy potential towards attainment of net-zero energy buildings status—a critical review. Journal of Cleaner Production.
- [4] Caliskan, H., Dincer, I., Hepbasli, A. 2012. Thermodynamic analyses and assessments of various thermal energy storage systems for buildings. Energy Conversion and Management, 62, 109-122.
- [5] Kuznik, F., Virgone, J., Roux, J.J. 2008. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental

- investigation. *Energy and Buildings*, 40, 148-156.
- [6] Beltran, R.D., Martínez-Gomez, J. 2019. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. *Journal of Building Engineering*, 24.
- [7] Mohseni, E., Tang, W., Wang, S. 2019. Investigation of the role of nano-titanium on corrosion and thermal performance of structural concrete with macro-encapsulated PCM. *Molecules*, 24(7).
- [8] Al-Homoud, M.S. 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building Environment*, 40, 353-366.
- [9] M'hamdi, Y., Baba, K., Tajayouti, M., Nounah, A. 2022. Energy, environmental, and economic analysis of different buildings envelope integrated with phase change materials in different climates. *Solar Energy*, 243, 91-102.
- [10] Zhang, L., Zhang, Q., Jin, L., Cui, X., Yang, X. 2024. Energy, economic and environmental (3E) analysis of residential building walls enhanced with phase change materials. *Journal of Building Engineering*, 84.
- [11] El-Raheim, D.A., Mohamed, A., Fatouh, M., Abou-Ziyan, H. 2022. Comfort and economic aspects of phase change materials integrated with heavy-structure buildings in hot climates. *Applied Thermal Engineering*, 213.
- [12] Souayfane, F., Biwole, P.H., Fardoun, F., Achard, P. 2019. Energy performance and economic analysis of a TIM-PCM wall under different climates. *Energy*, 169, 1274-1291.
- [13] Bagheri-Eshf, H., Safikhani, H., Motahar, S. 2020. Multi-objective optimization of cooling and heating loads in residential buildings integrated with phase change materials using the artificial neural network and genetic algorithm. *Journal of Energy Storage*, 32.
- [14] Lagou, A., Kylili, A., Sadauskiene, J., Fokaidis, P.A. 2019. Numerical investigation of phase change materials (PCM) optimal melting properties and position in building elements under diverse conditions. *Construction and Building Materials*, 225, 452-464.
- [15] Yemenici, D.K., Barış, K.E. 2024. Faz Değiştiren Malzeme ve Isı Yalıtım Malzemesi Kombinasyonunun Eğitim Binalarının Isıl Konforu ve Enerji Yüklerine Etkisi. *Mimarlık, Planlama ve Tasarım Alanında Orijinal Araştırma ve Derlemeler*, Ekim 2024, ss. 145-183.
- [16] TS 825, 2024. Binalar için Isı Yalıtım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara. Türkiye.
- [17] U.S. Department of Energy. Input Output Reference, 2021. *EnergyPlus™ Version 9.0.1 Documentation*, ss. 139.
- [18] Türkiye İstatistik Kurumu. 2022. Elektrik ve doğal gaz fiyatları, dönem I: Ocak-Haziran, 2022. (Erişim tarihi: 24.10.2024). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=45567>
- [19] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. t.y.. İl ve ilçeler istatistik: Antalya. (Erişim tarihi: 24.10.2024). <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ANTALYA>
- [20] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. t.y.. İl ve ilçeler istatistik: İstanbul. (Erişim tarihi: 24.10.2024). <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISTANBUL>
- [21] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. t.y.. İl ve ilçeler istatistik: Ankara. (Erişim tarihi: 24.10.2024). <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=ANKARA>
- [22] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. t.y.. İl ve ilçeler istatistik: Van. (Erişim tarihi: 24.10.2024). <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=VAN>
- [23] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. t.y.. İl ve ilçeler istatistik: Erzurum. (Erişim tarihi: 24.10.2024). <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ERZURUM>
- [24] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 2018. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Ankara. Türkiye.